泡沫混凝土的应用

赵烁

重庆交通大学材料科学与工程学院

重庆 402260

摘要：作为一种新型的建筑材料，泡沫混凝土因其密度小，保温、隔热、隔音且防火性能好的特点以及在利废性、使用成本等方面的优势，于我国墙体材料与建筑节能等方面的战略政策规划上，起到了越来越重大的作用。本文介绍了泡沫混凝土的组成及其应用，并总结了在现实使用时合适的配合比设计，对比了国内外泡沫混凝土发展情况，提出了泡沫混凝土目前应用上的问题，在此基础上作出相关展望，并以个人视角提出泡沫混凝土的一些新应用。

关键词：泡沫混凝土；应用；外加剂；配合比；绿色环保

Application of Foamed Concrete

Zhao Shuo

College of materials science and engineering, Chongqing Jiaotong University

Chongqing 402260

Abstract: As a new type of building material, foamed concrete has main characteristics such as low density, good insulation, and good fireproofing, the advantages of waste use and use-cost are also introduced. In Chinese strategic policy and protection fields such as materials of walls and energy saving of building, more and more important influence it has own with these characteristics and advantages. Material composition, application of foamed concrete in this paper have introduced, especially a summary of the mixed proportion of practical application, the development of domestic and abroad are compared, and put forward some trouble of application of it, based on that, the future of foamed concrete has prospected. Meanwhile, from a personal view, the new application of foamed concrete is put forward.

Key Words: foamed concrete; application; additives; mix proportion; environment protection

1 引言

如今世界各国对多孔混凝土的研究非常重视，泡沫混凝土作为多孔混凝土的一种，于1950年，由苏联向我国传播，随着我国的飞速发展，国家大力发展各行各业时也对相关产业要求越来越高，因其优良的性能，泡沫混凝土得到了国家的重点发展。它是以机械方法将发泡剂水溶液产生的泡沫加入到含硅质材料（砂、粉煤灰等）、钙质材料（石灰、水泥等）、水以各种外加剂等组成的料浆中，经充分混合搅拌后再浇筑成型，养护而成的一种内部含有大量封闭式气孔的混凝土[1]。而大量封闭式气孔使其具有轻质、保温、隔热、隔音、耐火等各方面优良性能。轻质作为泡沫混凝土的突出优点之一，其干密度一般只有200~1600kg/m³，仅仅相当于黏土砖的1/3~1/10或普通混凝土的1/5~1/10。今天的建筑朝高层、大跨发展，在设计时建筑材料的自重显得越来越重要。经研究，若在建筑物墙体、屋楼面、立柱等位置使用泡沫混凝土，一般可使建筑物自重降低25%左右。有些甚至可达总重30%~40%。并且如果在结构构件上以泡沫代替普通的混凝土，更可提高构件的承载能力[2]。现在应用泡沫混凝土的领域已至二十多个。在我国提出“双碳”战略的今天，对价格低廉、废物利用率高，具有各方面优秀性能的泡沫混凝土进行总结并予以推广，有了更加深刻的意义。

2 泡沫混凝土的组成

1.1 发泡剂

泡沫混凝土中的泡沫不仅可以提高混凝土的流动性与施工性，更可以让混凝土具有轻质、高强等性能。制备优异泡沫是生产泡沫混凝土的关键，如因应力集中而造成的开裂现象就可以被制备时泡沫均匀集中的泡沫混凝土有效降低[3]。发泡剂只有产生的泡沫足够稳定性，在与料浆混合时产生的薄膜不被破坏的才能拿来使用。

发泡剂性能衡量指标通常为泡沫坚韧性、发泡倍数、沁水量等。泡沫坚韧性以泡沫柱在单位时间内沉陷的距距离来衡量；发泡倍数即发泡剂溶液所产生的泡沫体积与其自身体积之比；沁水量指的是泡沫破灭后所产生发泡剂溶液的体积[4]。现如今，发泡方法可分为化学与物理发泡两种。化学发泡法是将发泡剂掺入混凝土浆液中产生化学反应，以生成气泡，其优势在于制备简单，密度较低，但发泡过程难以控制，会导致泡沫均匀性较差；相较于化学发泡类发泡剂，物理发泡剂制备的泡沫寿命较长，大小均匀且

可控制，优势更加明显。在建筑工程中，物理发泡剂发泡后通过压缩搅拌等工艺与料浆混合后再浇筑成型的方法也更加适用[5]。高华等研究发现液体发泡剂总体性能优于粉末发泡剂，且发泡剂pH值会影响水泥的水化反应，故在实际生产中，应优先使用接近水泥pH的液体发泡剂[6]。习志臻在以松香发泡剂为实验对象的研究发现，，当碱的浓度在20%~25%之间时，反应更完全；在配方时若将胶占比控制在31.2%产生的泡沫则会更加均匀[7]。李文博则将物理发泡剂分为植物、动物、复合性三种，以大量试验分别对这三种发泡剂在发泡倍数、发泡稳定性及成型泡沫混凝土性能上进行对比，并综合考虑性能与使用成本等因素后，他认为复合性发泡剂是制备时的最佳发泡剂。经朱明等研究发现由于空隙率对导热系数起主导作用，即使泡沫混凝土平均孔径会随发泡剂掺量增加而增大，同时平均孔径的增大会削弱孔隙率对导热系数影响，但导热系数仍是呈现下降趋势[8]。Kuzielov等采用不同体积发泡剂和恒定的水灰比制备多组泡沫混凝土进行对比，结合SEM与XRD分析其平均孔径和晶体组成等得出研究数据，表明发泡剂浓度降低有助于提升泡沫稳定性[9]。而延常玉通过大量试验建议发泡剂掺量为5%[10]。

1.2 水泥

水泥是混凝土组成材料中最重要的材料，不仅是其成本支出最多的材料，更是影响混凝土强度、耐久性最重要的影响因素。一般情况下在干物料总量中水泥用量要占70%~100%。泡沫混凝土作为一种大水灰比液态混凝土，为使其快速凝结，以增强其早期强度并防止其在成型前沉降或沁水，宜采用早强，微膨胀，低干缩的铁铝酸盐水泥或硫铝酸盐水泥[8]来制备泡沫混凝土。

1.3 粉煤灰

粉煤灰兼具生成胶凝材料与集料的两重作用，其活性越好与泡沫混凝土质量一定程度上成正比关系。E.P.Kearsley等以粉煤灰代替75%质量分数的水泥，从养护28天与1年后测定的强度值来看，虽其早期抗压强度减小明显，但后期增长很快。乔欢欢等研究发现粉煤灰的掺入可以对泡沫混凝土抗冻性起改善作用[25]。黄钜行等人研究则发现水灰比与水泥料浆密度呈负相关，0.45为制备泡沫混凝土的最佳水灰比[11]。赵铁军等测定了28d与1年的强度表明，泡沫混凝土抗压强度受粉煤灰影响很小，干密度才是其决定因素，其预测若水泥养护较好，若

采用粉煤灰大掺量代替水泥，也不会显著影响其长期抗压强度[12]。赵进等研究发现采用20%质量分数的粉煤灰取代水泥制备泡沫混凝土时泡沫混凝土的导热系数、抗压强度与吸水率等均有提高[13]。熊传胜等研究表明，在以优质的粉煤灰等质量取代水泥时，对泡沫混凝土不仅可以降低其导热系数，在同等条件下，其强度也有所提高[14]。

1.4 石灰

宜将生石灰用量控制在在10%~15%之间时，因其消化时产生热量对粉煤灰泡沫混凝土早期强度的提高有利且能提高其质量[15]。

1.5 石膏

石膏在泡沫混凝土中可以起到激发剂作用，控制其用量在3%~4%左右时，泡沫混凝土早期强度会急剧增大[7]。

1.6 轻质集料

轻集料因孔率高故大多数轻集料吸水性较高且密度较低，对产品来说其加入量与产品吸水率与密度关联很大。在设计容重等级要求较大时可掺入如炉渣、陶粒、砂等轻集料，在设计较低等级容重时可以考虑掺入如膨胀珍珠岩、EPS颗粒等超轻集料。以膨胀珍珠岩为功能调节剂生产泡沫混凝土时不仅可以使料浆上下均匀从而增大混凝土浇筑高度，还可以使产品具有良好的吸音效果[16]。

1.7 外加剂

泡沫混凝土因自身具有大量气泡而具备各项优异性能，同时也会有干缩大，吸湿性强等特点，当其作为缺点出现而影响产品性能时，可在设计制造泡沫混凝土产品时采用外加剂来弥补其缺点。

(1) 稳泡剂

一般以胶类物质为稳泡剂其加入可显著提高泡沫混凝土泡沫中液泡的稳定性。泡沫中的液体析出快慢与液膜强度决定泡沫的稳定性，若增加液体粘度即可有效解决这两个问题。在加入稳泡剂后，发泡倍数降低明显，但泡沫稳定性同时可以得到显著提高，从而提高泡沫混凝土的各项性能。稳泡剂通常与发泡剂复合配制使用以保证产生泡沫的稳定性。牛云辉等在试验中发现，当稳泡剂掺量为0.03%时泡沫混凝土料浆沁水现象消失，流动性降低并且料浆表面泡沫破灭；当稳泡剂产量增加至0.06%时料浆浆体较为粘稠，这可使一些有害的大气泡无法排出。表明了稳泡剂对泡沫混凝土工作性与保水性的巨大影响。由这些试验得出为了获得无沁水且不粘稠的泡沫混凝土料浆，稳泡剂的范围应在

0.03%~0.06%间选择0.06%的掺量的结论[17]。

(2) 激发剂

激发剂主要是用来在泡沫混凝土料浆与泡沫混合后在泡沫消散前使料浆快速凝结的一种外加剂，其主要在水泥混合场合采用，它可以有效降低泡沫混凝土中泡沫早期在料浆凝结前移动消散等造成的塌模现象。但激发剂总会降低泡沫混凝土最终强度，故在实际选取时需谨慎考虑。

(3) 减水剂

减水剂是可以通过其表面的吸附分散与湿润润滑作用改善料浆流动性的一种外加剂，它可以使泡沫混凝土在较低水灰比下完成料浆与泡沫的混合。但由于减水剂会产生与发泡剂在某些性能上相反的一些作用且其价格较贵，故减水剂种类与使用数量必须根据试验与实际情况决定。牛云辉等以聚羧酸盐减水剂为试验对象，发现当其掺入量在0.5%~2.5%间时是最佳掺量范围[17]。

(4) 防水剂

防水剂可以显著提高混凝土在防水方面的性能，从而有效降低渗水现象，减少其吸水量，以此提高泡沫混凝土耐久性并延长其寿命。李娟等在试验中采用F1防水剂，发现其对泡沫混凝土强度性能方面无负面影响，在掺入后多数泡沫混凝土强度甚至得到提高，并且随着掺入量增加，泡沫混凝土吸水率明显快速下降[18]。

(5) 纤维

传统泡沫混凝土其强度普遍不高，而纤维的加入大大增加了泡沫混凝土的强度。目前纤维已经成为了制备泡沫混凝土的常用材料之一。纤维主要分为天然与化学两大类。天然纤维包括动物毛发、亚麻与黄麻等植物纤维；化学纤维包括了碳纤维、聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维、玻璃纤维等，聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维与玻璃纤维等目前应用较多。在泡沫混凝土中加入纤维可以增加泡沫混凝土的可塑性、抗拉强度、抗折性等性能。延常玉等认为在发泡剂掺量与硅灰掺量各为5%与4%时pp纤维掺量0.1%是最合适的配合比[10]。邓均等对聚乙丙烯纤维的研究发现，当其体积率为0.08%时6mm的泡沫混凝土的抗压抗折能力最高；掺入体积率为0.15%的12mm聚乙丙烯纤维对泡沫混凝土早期的收缩抑制效果显著[19]。陈兵等研究试验采用掺加微硅粉与聚丙烯纤维技术制备出了表观密度800~1500kg/m³ 并且抗压强度达到10~50MPa的泡沫混凝土，得出了对于低抗压强度的泡沫混凝土，可以

通过掺加聚丙烯纤维来增强其强度，从而得出掺加聚丙烯纤维可以显著改善泡沫混凝土的干缩性的观点[20]。国外Cai等对比了线性聚丙烯纤维和网状聚丙烯纤维对400kg/m³混凝土抗压、抗拉和吸水性的影响。其实验结果表明，添加纤维对泡沫混凝土的吸水率影响不大，在适量添加下可以提高泡沫混凝土抗压强度(60.7%)和抗折强度(71.2%)，并且线性纤维性能优于网状[21]。Novais等采用废弃玻璃纤维制备泡沫混凝土时发现掺加入短且分布随机的玻璃纤维对抗压强度影响非常明显，当掺加3%的玻璃纤维时，抗压强度可提高162%[22]。Flores-Johnson等则研究发现使用聚乙烯醇纤维可以增强泡沫混凝土试件的密实度，提高试件抗压强度。并且添加纤维除了可以降低泡沫混凝土收缩开裂、提高力学强度外，对提高泡沫混凝土抗冲击、抗折和抗疲劳也有一定效果[23]。

(6) 橡胶

橡胶掺入混凝土中不仅可以改善混凝土力学特征，还可以减轻废弃橡胶对环境的污染问题。卢龙刚等研究发现，在同一应变率水平下，泡沫混凝土动态抗压强度会随着橡胶掺入量的增大而减小[24]。

(7) 其余外加剂

泡沫混凝土具有良好的利废性，它可以充分利用大量工业废渣，对环境保护有重要作用，若以不同各种废渣加以筛选作为外加剂等量取代水泥时，由于它们的粒度及矿物活性方面的不同，呈现出的泡沫混凝土的强度等性能最终也不同。如乔欢欢等研究发现，向泡沫混凝土中掺入硅灰可以显著提高其早期强度，掺入磨细灰后其后期强度发展也会较快，并且掺入硅灰后会使其吸水率增加，而且掺入磨细灰可以显著降低泡沫混凝土的吸水率[25]。延常玉建议在发泡剂掺量为5%时硅灰掺量为4%[10]。熊传胜等以钢渣粉与粉煤灰复合取代水泥在同等条件下对其干体积密度影响不大，但可以在其强度上得到良好的结果[14]。孙文博等制作的陶粒泡沫混凝土砌块其导热系数仅为0.312W/（m•k），在节能方面可以起到很大作用[26]。此外，像膨胀剂可以有效减少泡沫混凝土的塌模现象。我们可以在实际应用中选取相关外加剂来增强泡沫混凝土性能或减少成本消耗。

(8) 外加剂耦合性研究

在设计泡沫混凝土时，我们要综合多个方面进行考虑，其中很重要的一点就是考虑外加剂的耦合性，使外

加剂能够最大程度上改善泡沫混凝土性能以达到相关产品要求。此处泡沫混凝土外加剂的耦合性是借用物理学概念，其可以理解为：两种或两种以上的外加剂相互影响后决定泡沫混凝土最终性能的现象。以王翠花和牛云辉等人的研究为例。王翠花等人在试验中对烷基苯磺酸盐、三乙醇胺、阿拉伯胶三种外加剂加以研究。发现当三乙醇胺掺量为0.1~0.15L时，其对泡沫的稳定性有相应的改善作用；烷基苯磺酸盐可改善发泡剂性能，当烷基苯磺酸盐的掺量为0.2~0.4时，可以有效改善发泡剂发泡倍数和泡沫稳定性；当阿拉伯胶掺入料浆中，虽然引起了泡沫起泡量降低却对泡沫稳定性有改善效果；当三乙醇胺与阿拉伯胶复合掺入料浆后，虽发泡倍数基本没有变化，但对比单独掺加三乙醇胺时泡沫稳定性有进一步改善。所以得出适宜的掺量为三乙醇胺0.15mL,阿拉伯胶0.5~0.6g的配合比[27]。牛云辉等考虑到若聚羧酸系减水剂掺量为2.5%时，可以取得非常理想的减水效果，但却会延长泡沫混凝土的凝结时间，因为严重的缓凝可能会导致现浇泡沫混凝土塌模，所以需要增加速凝剂的用量。但同时，虽然速凝剂可以缩短凝结时间，起到一定的早强作用，但大掺量的速凝剂又会降低料浆的流动性，影响泡沫混凝土的后期强度。同时，稳泡剂具有很好的保水性与稳泡特性，在很大程度上可以提高泡沫混凝土泡沫的稳定性，但加入稳泡剂后料浆粘度增加又会使泡沫混凝土工作性下降。此外，使用PP纤维可以在局部起到很好的阻裂增韧作用，但其分散却要求料浆具备优良的的流动性，此时在水灰比不变的情况下就需要增加减水剂来体现其减水效果[17]。

3 泡沫混凝土应用及配合比设计

2.1 泡沫混凝土应用意义

泡沫混凝土有诸多优点，具体如下：1、较好的轻量性，其密度可以达到200~1600kg/m³，在建筑应用上可以在很大程度减轻建筑载荷；2、隔音上其效果是普通水泥的5~8倍；3、适用温度上相较在75℃就会软化且发生化学反应的苯板，泡沫混凝土适用温度可达到250~300℃；4、节能环保性好，首先泡沫混凝土的添加剂主要为无毒无害的植物蛋白纤维和动物性蛋白，而苯板及以珍珠岩颗粒为代表的化学隔热材料会在高温下产生有害气体。其次大量气泡混合其中可减少石料、水泥等材料的使用，并且施工时噪音小，产品使用期间也可减少噪声污染

[28]；5、隔热性上其导热系数是普通水泥20~30倍，为0.08W/M.K；6、工艺较为简单，施工速度快，节约工期；7、强度高，当其密度为350kg/m^{3}时，7d抗压强度可以达到6kg/cm^2，28d为9kg/cm^2[29]；8、直立性强，可自立垂直成型，单层垂直高度可达10m；9、流动性强，有利于管道泵送，最大水平泵送距离可达1000m，垂直距离可达30m；10、耐久性强，与其他高分子材料相比，其结构耐久性强、耐热性好，具备较强防污能力[6]；

2.2 泡沫混凝土总体配合比设计

在应用泡沫混凝土前，为控制泡沫混凝土质量，需设计出符合要求的配合比来确定水泥、轻集料，发泡剂、外加剂等物质的掺入量。在设计各原料配合比，优化各原料组分间的比例时，应该要先确定泡沫混凝土产品所需干密度，再设计其原材料配合比以控制相应的导热系数与强度。李应权等研究得出泡沫混凝土配合比设计公式，具有很强的应用与参考意义：

水泥-粉煤灰-泡沫-水原料体系的配合比设计关系为

$$\rho_{干} = S_a（M_c + M_{fa}）$$

$$M_w = \Phi（M_c + M_{fa}）$$

式中：$\rho_{干}$为泡沫混凝土设计干密度（kg/m^3）；S_a为泡沫混凝土养护28d后各基本组成材料的干物料总和制品中非蒸发物总量所确定的质量系数，普通硅酸水泥取1.2，硫铝酸盐水泥取1.4；M_c为1m^3 泡沫混凝土的水泥用量（kg）；M_{fa}为1m^3 泡沫混凝土的粉煤灰用量（kg），一般情况下M_{fa}为干粉料的0~30%；M_w为1m^3 泡沫混凝土的基本用水量（kg）；Φ为基本水料比，视施工和易性可做适当调整，一般取0.5。

在泡沫混凝土中（1m^3 ），由水泥、粉煤灰与水组成的浆体总体积记V_1，泡沫添加量记V_2，即若配置单位体积的泡沫混凝土，由水泥、粉煤灰、水组成的料浆体积不足的部分以泡沫填充V_1与V_2计算公式如下：

$$V_1 = \frac{Mfa}{\rho fa} + \frac{Mc}{\rho c} + \frac{Mw}{\rho w}$$

$$V_2 = K(1 - V_1)$$

式中：ρ_{fa}为粉煤灰密度(2600kg/m^3) ρ_c为水泥密度(3100kg/m^3)；ρ_w为水密度，(1000kg/m^3)；V_1为加入泡沫前，

由水泥、粉煤灰、水组成的料浆总体积（m³）；V_2为泡沫添加量（m³）；K为赋予系数，通常大于1，视泡沫剂质量和制泡时间而定，主要应考虑泡沫加入到浆料中再混合时的损失，对于稳定性好的泡沫剂，一般情况取1.1~1.3。

其中泡沫剂的用量按下式计算：

$$M_y = V_2 \rho_{泡}$$

$$M_p = M_y / (\beta + 1)$$

式中：M_y为形成泡沫液质量（kg）；$\rho_{泡}$为实测泡沫密度（kg/m³）；M_p为1m³ 泡沫混凝土的泡沫剂质量（kg）；β为泡沫剂稀释倍数[30]。

良好的配合比设计，不仅可以保证产品质量，还可以减少资源浪费并降低生产使用成本。所以在制备泡沫混凝土产品之前计算好各组分配合比是重中之重。

2.3 泡沫实际应用及参考配合及设计

(1) 泡沫混凝土砌块

泡沫混凝土砌块在已应用于墙体屋面等节能材料中应用量最大。泡沫混凝土因为其具有良好的热工性能，以其通常在0.08~0.25W/（m·K）间导热系数而具有显著的保温隔热效果。在不同地区对泡沫混凝土砌块要求不同。我国的南方地区一般使用900kg/m³~1200kg/m³泡沫混凝土砌块，用来作为框架结构填充墙；在我国北方地区，主要采用其作为墙体保温层，若砌筑200mm~250mm的泡沫混凝土砌块作为外墙，在保温效果上相当于490mm厚的传统墙砖。以西安某工程研究中心研制的600kg/m³产品为例，其技术性能为：干容重648kg/m³、抗压强度为3.6MPa、吸水率为12.0%、干燥收缩值0.72mm/m，且抗冻性上25次冻融循环合格，产品具备良好的社会效益，对其他泡沫混凝土产品的制备也有相关参考价值。其公开配合比为[31]：

原材料	用量（kg）
水泥（42.5R硅酸盐水泥）	180kg
粉煤灰（烧失量不大于5%）	330kg
矿渣超细粉（细度6000cm²/g）	45kg
石灰（140目，有效CaO≧70%）	8kg
复合外加剂（硫酸盐、硅酸盐，复合外加剂：水=1：5）	20kg
纤维（植物纤维，	5kg

且纤维：水=1:5）	
C-3减水剂（减水率不小于25%，且减水剂：水=1:10）	0.5kg
F-3发泡液（自制，且发泡剂：水=1:23~1:25）	3.5kg
水	18.kg

在肖力光等关于高掺量粉煤灰泡沫混凝土砌块试验研究中，以配合比为[32]：

原材料	用量（kg）
水泥	1
粉煤灰	1~1.6
（激发剂）熟石灰	0.05~0.25
石膏	0.05~0.20
减水剂UNF	0.005~0.01
早强剂硫酸盐	0.005~0.02
膨胀剂	0.005~0.09
发泡剂	适量
粉煤灰	60%

制造出的产品其抗压强度为3.4MPa、干燥收缩值为0.72mm/m、碳化系数为0.89、导热系数0.21W/（m·k），可以经历十五次冻融循环并保持合格。肖力光等同时由试验表明当粉煤灰细度提高后，产品抗压能力相应得到提高。

(2) 泡沫混凝土墙板

① 用作保温层

在我国，建筑耗能占社会总耗能的三分之一以上，一般为30%~40%。我国大力推行采用保温节能墙体是实现我国建筑节能的重要措施之一。在建筑保温上应用的泡沫混凝土其密度一般较低，为200~400kg/m^3，导热系数一般在0.051~0.076 W/（m·k），抗压强度为0.2~0.5MPa[33]。在项泽强等人对复合保温墙板的研究中，他们在原材料中外掺甲酸钙、内掺硫铝酸盐水泥来控制泡沫混凝土初凝时间为60min,选出最合适的泡沫混凝土最佳配合比：

原材料	用量（kg）
普通硅酸盐水泥	50.0
硫铝酸盐水泥	40.0
粉煤灰	4.0
石膏	6.0
保水剂掺量	0.2
减水剂掺量	2.5
聚丙烯纤维掺量	5.0
PET废塑料纤维掺量	5.0

其中发泡剂稀释比1:20，水灰比0.25，使其料浆表观密度控制在850kg/m^3，并将其在养护温度控制在35℃的养护炉中养护24h后脱模，后覆

膜或洒水再养护6d[34]。

② 用作轻质墙板

与传统GRC轻质墙板相比，中国建筑材料科学研究院以45%~65%的硫铝酸盐水泥，30%~40%的粉煤灰，0%~15%的膨胀珍珠岩与泡沫混合后所制产品，在保证产品使用效果与GRC轻质墙板相同情况下，不但明显降低产品成本，而且改善了料浆流动性使成型更加方便。此类泡沫混凝土产品得到相应的推广。

③ 用作隔音板

因泡沫混凝土属于多孔材料，具有良好的隔音效果，在用作楼层隔音层或高速路隔音板时不仅效果显著而且价格低廉，并且因其良好的利废性还可以处理大量废渣。Andrade等研究发现干容重500~900kg/m^{3}的泡沫混凝土其隔音性能可以达到20db，是值得推广的优质隔音材料[35]。

(3) 泡沫混凝土补偿地基

由于建筑群各部分自重不同，在施工过程中会产生自由降沉差，故在设计中会于建筑物自重较低部分的基础以软材料作补偿地基使用。其使用的泡沫混凝土密度一般≤200kg/m^3。在北京团结湖大厦部分基础中即浇筑了150mm厚度、0.10±0.02MPa、密度＜200kg/m^{3}泡沫混凝土，取得显著效果。

(4) 泡沫混凝土挡土墙

泡沫混凝土主要用在港口岸墙上，用作轻质回填材料时既可以减少对岸墙侧向载荷，也可以降低其垂直载荷，同时还可以降低相关维修费。泡沫混凝土也可以取代边坡部分土壤来增进路堤边坡稳定性，其应用的泡沫混凝土密度一般在400~600kg/m^3。

(5) 用作修建田径跑道、运动场

在使用密度为800~900kg/m^{3}的可渗性泡沫混凝土在保证排水性时作为运动场的基础上，覆以人造草皮、砾石即可作为运动场，若覆以0.05mm多孔沥青层或塑料层即可作为田径跑道使用。

(6) 用作夹心构件

在预制钢筋混凝土构件时可使用密度为400~600kg/m^{3}的泡沫混凝土使构件具有轻质、高强、隔热等良好性能。

(7) 用作管线间填充

泡沫混凝土可以提高金属圆管挂板的吸能性能，此处一般采用的泡沫混凝土密度在600kg/m^{3}左右。周宏元等通过对填充泡沫混凝土的铝管组合挂板的吸能性能研究认为在实际应用中应根据泡沫混凝土密度确定组合挂板芯层中合理的铝管间距，确定当泡沫混凝土密度较小时选择小间距，密度

大时选择大间距[36]。

(8) 用作空洞填充工程

泡沫混凝土回填灌浆具有在保证工程的情况下具有成本低、施工简单方便、回填速度高充实度高、管道上浮力小的特点。在一些地下容易因空穴火灾而导致塌方的区域，可采用价格低廉密度为600~1100kg/m³的泡沫混凝土解决相关问题。在引黄工程中，最终效果表明使用用设计强度为2.0MPa、绝干密度为1200kg/m³，浆体相对密度为1.55的泡沫混凝土浆体输送250m距离，对长隧洞一次回填40m在技术上是可行的[37]。在长隆宿舍项目中，采用容重500kg/m³的泡沫混凝土运用于卫生间、配电房等地，其吸水率较低，且具有一定防水性能，符合卫生间防水要求。同时密度较小，可以减小地下室顶板承受载荷[29]。

(9) 用作屋面边坡

泡沫混凝土在房屋屋面上也有巨大应用，它可将屋面保温层、找坡层与找平层三合一施工，可以一次现浇成型，在保证屋面防水抗渗、保温隔热等要求后经性能检测，屋面抗压强度高、耐磨损、隔音性能好，也不会龟裂，并且能有效减轻建筑物载荷。不仅可以简化屋面构造与施工工艺，也可以具备良好的经济效益与热工性能。一般坡度为10mm/m，厚度为0.03~0.2m的屋面边坡一般采用密度为400~600kg/m³的泡沫混凝土。在长隆宿舍项目上，运用了表观密度为500kg/m³的泡沫混凝土，有效降低了屋面载荷，提高了屋面隔音减振性能与防水能力[6]。此处配合比可以参考：

原材料	用量（kg/m³）
特种低碱水泥	18.0
普通硅酸盐水泥	33.0
轻质骨料	39.6
发泡剂	1.2
外加剂	1.92
水	40.0
防水透气液	0.32

(10) 用作储罐底支撑

在钢储罐等储罐底部浇筑泡沫混凝土不仅可以确保储罐底的支撑在焊接时处于最佳应力状态，同时形成的凸形地基也便于清理，一般此处泡沫混凝土采用的密度为800~1000kg/m³。

(11) 用作防火墙绝缘填充

防火墙是保障人们生命安全的重要组成部分。而火灾通常在高层建筑与建筑工地上发生，严重威胁人们的生命财产安全，在各类火灾中，外墙保温材料着火占有相当比例，采用泡沫混凝土可以在一定程度上解决这类

问题。干容重500~900kg/m^3的泡沫混凝土其耐火极限一般可以达到2.7~3h，是理想的耐火材料[28]。

4 泡沫混凝土国内外比较及展望

3.1 国内目前现状

(1) 发泡剂

我国目前所使用发泡剂主要是各种表面活性剂，如松香胶、废动物毛发、树脂皂类发泡剂、蛋白质水解物及高分子表面活性剂等，总体上功能偏少且稳定性差，制品强度低。但近年来，在我国相关性能较好的固体树脂与蛋白质发泡剂已经被开发出来，如CON-A型泡沫剂、CCW-95型固体泡沫剂、U型发泡剂等[38]。有追赶超越的趋势。

(2) 发泡机

我国主要采用高速搅拌发泡机，先将发泡剂溶液倒入料仓后以剧烈搅拌产生预制泡沫，再将预制泡沫与调配好的泡沫混凝土料浆一起均匀搅拌后浇筑成型。此法预制的泡沫不仅容易在中途环节中破灭，也容易在当场未用完情况下破灭造成浪费[39]。

(3) 我国相关工程中存在问题

1、料浆稳定性较差：由于在发泡技术与发泡机本身等方面的不足，造成在泡沫混凝土制造时料浆发泡普遍不稳定，硬化成型后气泡不均匀；

2、产品强度偏低：在800~850kg/m^3体积密度的泡沫混凝土抗压强度普遍低于2.0MPa，有些甚至不到1.0MPa。对于表观密度≦400kg/m^3在保温用途的产品，抗压强度甚至不到0.4MPa。

(4) 结论

我国泡沫混凝土还没有国家建立的相关标准，产品质量参差不齐，对比国外，应用规模整体偏小，技术水平不高且缺少大宗应用的产品。且生产装备上我国还以人工配料电控手动等为主，与欧美相比落后更加明显。但我国正在迎头赶上。

3.1 国外目前现状

(1) 发泡剂

国外发泡剂多以蛋白质发泡剂为主，发泡数量多、稳定性好，其产品强度较高[7]。

(2) 发泡机

国外主要采用压缩空气发泡机，即将一定浓度发泡剂溶液倒入料仓后，用气泵调节料仓内压力，当其达到相关值后将泡沫自动喷出。不仅效率高而且可以连续供泡，并直接吹入预制的泡沫混凝土料浆中，可以有效防止中途环节导致泡沫破灭的问题。

(3) 全球泡沫混凝土应用问题

1、现有发泡剂制备的泡沫混凝土其强度、抗压能力与负载能力在实际

应用中难以作为建筑中支撑结构使用；

2、一些泡沫混凝土在工程中强度低，结构性较差，在温差较大的地下或水分较大的环境中容易出现裂缝、渗水等问题；

3、部分泡沫混凝土对浇筑技术与环境要求比较高[4]，不利于大范围的推广。

3.4 泡沫混凝土应用展望

1、进一步降低生产成本；

2、进一步减少对环境影响；

3、研发性能更好的发泡剂；

4、制造性能更好的发泡机；

5、研究在各种实际应用中更加合适的配合比；

6、扩展泡沫混凝土应用范围；

7、国家早日出台相关标准，最好可以形成国际标准。

5 个人对泡沫混凝土新应用思考

笔者认为，泡沫混凝土这种新型的建筑材料，目前的产能、产值以及应用前景等还有很高的发掘空间。从全球方面来看，泡沫混凝土的应用领域虽然已经扩展到了二十多个，但实际上，受困于目前泡沫混凝土的性能问题，特别是强度问题，原本可以在很多领域大放异彩的泡沫混凝土并没有展现出应有的能力。比如在建筑领域，泡沫混凝土垂直可泵距离有30m，可以单次垂直浇筑10m高的产品，单这一项便可以在实际工程中节约多少人力。泡沫混凝土并不应该只是某个技术、某个项目的点缀，它完全有能力成为主角。首先在日常小型家具等领域，如以泡沫混凝土制造日常生活家具，泡沫混凝土的一次成型便具有很高的应用前景，并且若以泡沫混凝土制造家具，家具的日常保养、修复都会变得相当简单；其次是在大型工程领域，若可以制造出强度足够高的泡沫混凝土，我们就可以单次浇灌一面墙壁、甚至一次浇筑一个楼层。根据计算建立相关函数模型，楼房等的施工就会变成搭积木一样简单；最重要的是泡沫混凝土所展现出来的利废性，大量工业废渣的加入甚至可以对其性能的提升起到正向作用，可以想象如果泡沫混凝土得到大力应用，那对工业废渣等的回收利用无疑是打开了新的大门。最后，新的材料也会有新用法，比如我们是否可以专门制造高渗水性的泡沫混凝土，直接与管线等浇筑在地面，依靠泡沫混凝土的渗水性使其直接给农作物、园艺植物等浇水，这样不仅可以保证水资源的充分利用，也可以减少不文明行为带出的垃圾给农田等带来的影响。

相信在未来泡沫混凝土的应用领域将越来越广泛，让我们拭目以待。

6 致谢

感谢求学路上遇到的鲁彪老师、徐朕老师、王锋老师，也感谢从没放弃的自己。

参考文献

[1] 重庆建筑工程学院、南京工学院编著. 混凝土学【M】. 北京：中国建筑工业出版社，1981.

[2] 蒋冬青.泡沫混凝土应用新进展【J】.中国水泥.2003(03)

[3] 刘佳奇,霍冀川,雷永林,李娴.发泡剂及泡沫混凝土的研究进展【J】.化学工业与工程.2010(01):73-78

[4] 高波,王群力,周孝德.混凝土发泡剂及泡沫稳定性的研究【J】.粉煤灰综合利用.2004(01):13-16

[5] 李灵.发泡剂在泡沫混凝土中的应用研究【J】.工程技术研究.2022(18):74-76

[6] 高华,董岳松,刘满金.泡沫混凝土用发泡剂性能对比试验研究【J】.混凝土世界.2022(09):35-39

[7] 习志臻.混凝土泡沫剂的研究【J】.江西建材.2000(03):5-8

[8] 朱明,王方刚,张旭龙,王发洲.泡沫混凝土孔结构与导热性能的关系研究【J】.武汉理工大学学报.2013(03):20-25

[9] KUZIELOVÁE,PACHA L,PALOU M.Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties[J].Construction and Building Materials,2016(125):998-1004.

[10] 延常玉.粉煤灰泡沫混凝土的制备及其性能研究【D】.宁夏大学.2022

[11] 黄钜行,史明辉,张锦涛,尹冠生.泡沫混凝土配合比设计及吸能特性研究【C】.257-267

[12] 赵铁军,高倩,王兆利.大掺量粉煤灰对泡沫混凝土抗压强度的影响【J】.粉煤灰.2002(06):7-10

[13] 赵进,徐俊伟,石芳婷,陈德鹏.预拌现浇泡沫混凝土的制备及其性能【J】.安徽工业大学学报(自然科学版).2020(01):87-93

[14] 熊传胜,王伟,朱琦,王亚松,徐尧,方永浩.以钢渣和粉煤灰为掺合料的水泥基泡沫混凝土的研制【J】.江苏建材.2009(03):23-25

[15] 王永滋.粉煤灰泡沫混凝土的生产与应用【J】.福建建设科技.2001(02):35-36

[16] 高倩,王兆利,赵铁军.泡沫混凝土[J].青岛建筑工程学院学报,2002,(23/3):113-115

[17] 牛云辉,卢忠远,严云,尹元坤.外加剂对泡沫混凝土性能的影响【J】.混凝土与水泥制品.2011(03):9-13

[18] 李娟,王武祥.改善泡沫混凝土吸水性能的研究【J】.混凝土与水泥制品.2001(05):43-44

[19] 邓均,霍冀川,宋言红,高银,赵星,刘煦.聚乙烯醇纤维泡沫混凝土的性能试验【J】.混凝土与水泥制品.2012(02):41-44

[20] 陈兵,刘睫.纤维增强泡沫混凝土性能试验研究【J】.建筑材料学报.2010(03):286-290+340

[21] CAIYD, WANGJS, LUOY F, et al. Different performance of foam concrete caused by two types of fiber[J]. Adv Mater Res, 2014, 842:156－159.

[22] NOVAIS R M, CARVALHEIRAS J, SEABRA M P, et al. Effective mechanical reinforcement of inorganic polymers using glass fibre waste[J]. J Cleaner Prod, 2017, 166:343－349.

[23] FLORES-JOHNSON E A, LI Q M. Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugat

ed steel faces[J]. J Cleaner Prod, 2012, 94(5):1555 - 1563.

[24] 卢龙刚,徐颖,葛进进,姚威,顾柯柯.不同橡胶掺量泡沫混凝土动态力学及能量特征【J】.混凝土.2022(09):6-10

[25] 乔欢欢,卢忠远,严云,舒朗.掺合料粉体种类对泡沫混凝土性能的影响【J】.中国粉体技术.2008(06):38-41

[26] 孙文博,李家和,张志春.陶粒泡沫混凝土强度及其影响因素研究【J】.哈尔滨建筑大学学报.2002(03):79-83

[27] 王翠花,潘志华.蛋白质类发泡剂的合成及其泡沫稳定性【J】.南京工业大学学报(自然科学版).2006(04):92-96

[28] 刘洋,聂荣.泡沫混凝土在绿色环保施中的应用【J】.红水河.2022(05):109-112

[29] 李聪聪,魏小强,温栋栋,李子凯,郑富家.泡沫混凝土在长隆宿舍项目中的应用【J】.建筑技术开发.2022(13):143-145

[30] 李应权,朱立德,李菊丽,扈士凯,段策,王笑帆.泡沫混凝土配合比的设计【J】.徐州工程学院学报(自然科学版).2011(02):1-5+90

[31] 张磊,杨鼎宜.轻质泡沫混凝土的研究及应用现状 1【J】.混凝土.2005(08):44-48

[32] 肖力光,盖广清,杨艳敏.高掺量粉煤灰泡沫混凝土砌块的试验研究【J】.新型建筑材料.2003(01):33-35

[33] 胡验君,苏振国,杨金龙.建筑外墙外保温材料的研究与应用【J】.材料导报.2012(S2):290-294

[34] 项泽强,李晓宁,赵敦,颜小波,梁泽锋,孟志武.泡沫混凝土复合保温墙板研究【J】.混凝土与水泥制品.2022(08):70-73+82

[35]C.Andrade,C.Alonso,J.Sarria.c.Drmsion rate evolution in concrete structures to the atmosphere,Cement&Concrete Compo sites.2002.24:55-64.

[36] 周宏元,樊家乐,王小娟,刘浩.填充泡沫混凝土铝管组合挂板的吸能性能.复合材料学报

[37] 王武祥,刘宁,罗栓定.泡沫混凝土在引黄工程洞穿管回填中的应用【J】.混凝土与水泥制品.2002(04):12-15

[38] 袁俊,徐迅.泡沫混凝土的研究现状及发展动态【J】.墙材革新与建筑节能.2007(04):31-33+3

[39] 张磊蕾,王武祥.泡沫混凝土的研究进展及应用【J】.建筑砌块与砌块建筑.2010(01):38-42+15